Revista Internacional de
Ingeniería
de Estructuras

Vol. **23,3,** 305-339 (2018)

STUDY OF THE PERFORMANCE OF SEISMIC ISOLATORS OF PIER No. 12 OF THE BRIDGE "LOS CARAS", DURING THE EARTHQUAKE OF APRIL 16, 2016

J. Aroca[(1)], M. Gómez[(2)], E. Morales[(3)], M. Romo[(4)]

[(1)]Cuerpo de Ingenieros del Ejército. Av. Rodrigo de Chávez Oe4-19 Quito. jlarocapabon@gmail.com
[(2)]Cuerpo de Ingenieros del Ejército. Av. Rodrigo de Chávez Oe4-19. migueledu@hotmail.com
[(3)] Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de Fuerzas Amadas ESPE. Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos, eamorales5@espe.edu.ec
[(4)]Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de Fuerzas Amadas ESPE. Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos, mromop@yahoo.com.mx

Received: July 2018. Accepted: September 2018

ABSTRACT

The aim of this research project is to analyze and establish the performance of four Triple Friction Pendulum (TPF) isolators, located in Pier No. 12 in "Los Caras" Bridge, located in the province of Manabí-Ecuador.

The seismic isolators that presented the greatest displacements during the seismic action were initially evaluated by the Army Corps of Engineers of Ecuador (CEE), concluding that those located in Pier No. 12, needed to be analyzed.

From previous evidence, we analyze the results obtained in the Dynamic Load Test prior to the acquisition of the isolators for the "Los Caras" Bridge, contrasting this information with the results obtained in the Dynamic Load Tests performed on the four isolators of the Pier No. 12; based on the ideas presented, the characteristics and properties of the TPF Isolators are subjected to an analysis using an analytical model and a computational model, which describe properties such as: natural period, rigidity, frequency, damping, behavior regimes, among other; in order to establish the real behavior presented by these isolators.

Keywords: Seismic Isolators, Displacements, Behavior Regimes, Natural Period

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS DE LA PILA No. 12 DEL PUENTE “LOS CARAS”, DURANTE EL TERREMOTO DEL 16 DE ABRIL DEL 2016

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo analizar y establecer el desempeño de los cuatro aisladores tipo Triple Péndulo Friccionante (TPF), colocados en la Pila No. 12 del Puente “Los Caras”, ubicado en la provincia de Manabí.

Los aisladores sísmicos que presentaron mayores desplazamientos durante la acción sísmica fueron evaluados inicialmente por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército (CEE), concluyendo que aquellos que requerían analizarse están ubicados en la Pila No. 12.

De estas evidencias, se analizan los resultados obtenidos en la Prueba de Carga Dinámica previa a la adquisición de los aisladores para el Puente “Los Caras”, contrastando esta información con los resultados obtenidos en las Pruebas de Carga Dinámica realizadas a los cuatro aisladores de la Pila No. 12; sobre la base de las ideas expuestas, se someten las características y propiedades de los Aisladores TPF, a un análisis empleando un modelo analítico y un modelo computacional, los que describen propiedades tales como: período natural, rigidez, frecuencia, amortiguamiento, regímenes de comportamiento, entre otras; a fin de establecer el comportamiento real que presentaron estos aisladores.

Palabras Claves: Aisladores Sísmicos, Desplazamientos, Regímenes de Comportamiento, Período Natural.

1. INTRODUCCIÓN

El puente “Los Caras”, construido entre Bahía de Caráquez y San Vicente, constituye una estructura primordial para el Ecuador, llegando a ser una vía de comunicación prioritaria que une las ciudades antes citadas. Tiene una longitud total de 1.980m; estructuralmente está conformado por 3 sectores: el acceso desde Bahía de Caráquez, constituido por 6 tramos de 20m de luz y una longitud total de 120m; el acceso desde San Vicente, constituido por 5 tramos curvos de 30m de luz y una longitud total de 150 m; y, el sector central sobre el río Chone, conformado por 38 tramos rectos de 45m de luz, con una longitud total de 1.710m (Romo, 2008).

La innovación tecnológica de este puente se da gracias a 152 aisladores sísmicos, colocados a lo largo de las 38 pilas ubicadas bajo el agua, de las 48 existentes en el puente, como respuesta a la filosofía de diseño basada en la Norma Ecuatoriana de la Construcción Ecuatoriana (NEC-15), en la que se cita como uno de sus objetivos principales: la reducción del riesgo sísmico a niveles aceptables para el contexto ecuatoriano.

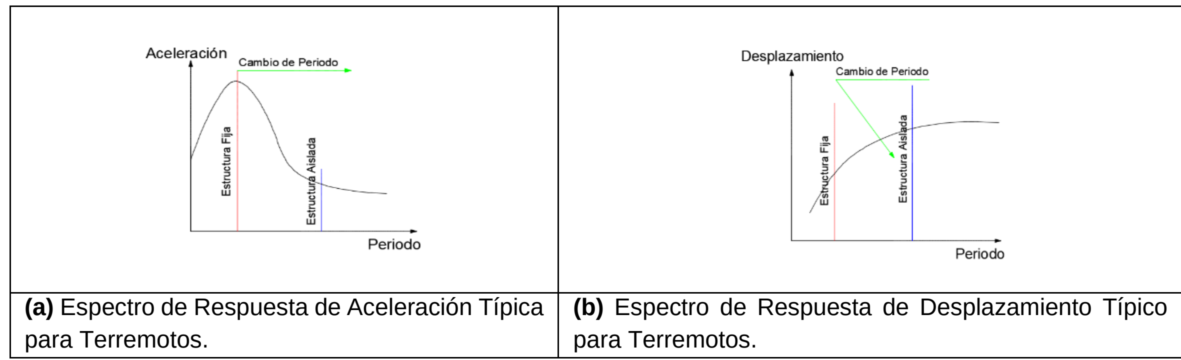
El sábado 16 de abril de 2016, a las 18:58 ECT, ocurrió un movimiento sísmico, con epicentro en coordenadas 0.353°N 79.925°W, entre las parroquias Pedernales y Cojimíes del cantón Pedernales, en la provincia ecuatoriana de Manabí, con una magnitud de 7,8Mw en la escala de Richter. Este sismo afecto algunas provincias de la Costa Ecuatoriana (E.P.N., 2016). El Puente “Los Caras” no presentó daño y fue empleado como vía principal de abastecimiento, traslado de heridos y ayuda humanitaria, debido principalmente a su diseño estructural con aislamiento sísmico.

Esta investigación pretende determinar el comportamiento de los aisladores sísmicos tipo TPF que presentaron mayores desplazamientos durante el sismo mencionado anteriormente, toda vez que previo a una inspección realizada por el CEE, se pudo determinar que en la Pila No. 12, se encuentran los cuatro aisladores que presentaron estas consideraciones ante las solicitaciones ocasionadas.

2. AISLAMIENTO DE BASE EN ESTRUCTURAS

El objetivo de un sistema de aislamiento sísmico es aumentar el período fundamental de vibración de la estructura usando una interfaz flexible o deslizante. El aislamiento de base cambia el período fundamental de la estructura, evitando que sea afectada por las altas frecuencias (períodos cortos), asociados con movimientos de terremotos. Los tres principios fundamentales para considerar en el diseño de sistemas de aislamiento sísmico son: i) Disipación de energía; ii) Rigidez baja; iii) Estabilidad

La Figura 1, muestra la aceleración absoluta típica y los espectros de respuesta de desplazamiento relativo de los movimientos del terremoto. La estructura aislada observada en la figura 1 (a), tiene un período más largo en comparación a la estructura fija y está sujeta a aceleraciones más bajas. La figura 1 (b), ilustra que el cambio en el período da como resultado mayores desplazamientos relativos. La flexibilidad del sistema aumenta los desplazamientos relativos que se concentran en el dispositivo/capa de aislamiento, en lugar de la estructura misma.



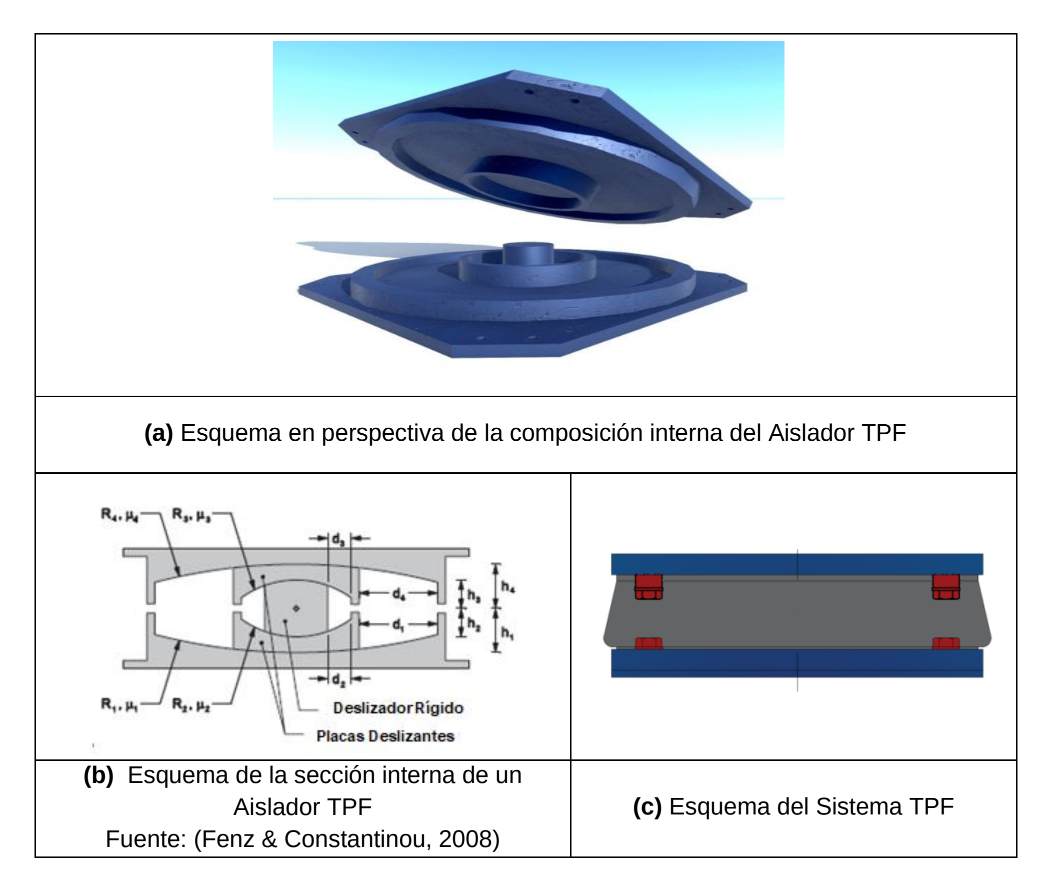
(a) Espectro de Respuesta de Aceleración Típica para Terremotos.

(b) Espectro de Respuesta de Desplazamiento Típico para Terremotos.

Figura 1 Espectros de Respuesta de Aceleración y Desplazamiento para Estructuras Fijas y Aisladas.

2.1. Principios de Operación de Aisladores de Base Tipo Triple Péndulo Friccionantes

El aislador TPF consta de dos superficies cóncavas de acero inoxidable separadas por un conjunto deslizante anidado internamente como se puede observar en la figura 2(a). Con referencia a la figura 2 (b), las placas cóncavas externas presentan radios de efectividad $R_{eff1} = R_1 - h_1$ y $R_{eff4} = R_4 - h_4$, donde R_i es el radio de curvatura de la ith superficie esférica y h_i es la distancia radial entre la ith superficie esférica y el punto de pivote del deslizador articulado. El conjunto deslizante articulado consta de dos placas de deslizamiento cóncavas separadas por un control deslizante rígido como se aprecia en la figura 2 (c). La superficie de las placas deslizantes donde se acoplan las placas cóncavas externas, están recubiertas con un material deslizante no metálico. Los coeficientes de fricción de estas interfaces son μ_1 y μ_4 . Las superficies internas de las dos placas deslizantes tienen huecos cóncavos esféricos con radios $R_{eff2} = R_2 - h_2$ y $R_{eff3} = R_3 - h_3$. Ambas superficies externas del deslizador rígido también están recubiertas con un material deslizante no metálico caracterizado por coeficientes de fricción μ_2 y μ_3 . Esto permite el deslizamiento en las superficies interiores de las placas de deslizamiento de acero inoxidable (Fenz & Constantinou, 2008).



(a) Esquema en perspectiva de la composición interna del Aislador TPF

(b) Esquema de la sección interna de un Aislador TPF
Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)

(c) Esquema del Sistema TPF

Figura 2 Esquema de la sección interna y externa de un aislador Triple Péndulo Friccionante

El comportamiento de un TPF se rige por las siguientes variables:

- R_i = Radio de curvatura de la superficie deslizante i.
- μ_i = Coeficiente de fricción de la superficie deslizante i.
- h_i = Altura de la interfaz deslizante i.
- d_i = Capacidad de desplazamiento de la interfaz deslizante i.

Las capacidades de desplazamiento nominal de las superficies deslizantes 1-4, se indican como $d_1 - d_4$ (debido a los efectos de la altura deslizante y la rotación deslizante, las capacidades de desplazamiento reales son ligeramente diferentes de lo establecido en la Figura 2 (b)). El comportamiento único del aislador TPF y los otros apoyos adaptativos se basa en parte a los diversos controles deslizantes que logran la capacidad de desplazamiento horizontal total de las superficies de deslizamiento respectivas durante la ejecución del movimiento. Por lo tanto, las capacidades de desplazamiento $d_1 - d_4$ son parámetros de diseño que influyen significativamente en el comportamiento global, no solo en los límites de capacidad general (Fenz & Constantinou, 2008).

El comportamiento adaptativo del aislador TPF, resulta de las diferentes combinaciones de deslizamientos, esto puede ocurrir en las múltiples superficies cóncavas. El movimiento está organizado en varios regímenes de deslizamientos, cada uno corresponde a una combinación distinta de superficies sobre las cuales

ocurre el movimiento. La rigidez del aislador es inversamente proporcional a la suma de los radios de curvatura de las superficies en que se produce deslizamiento. El coeficiente de fricción efectivo o nominal, también está relacionado con los coeficientes de fricción de las superficies sobre las cuales se produce el deslizamiento. La secuencia de los regímenes de deslizamiento está determinada por el coeficiente de fricción de cada superficie y la relación de capacidad de desplazamiento al radio de curvatura. Comenzando desde el reposo, el deslizamiento inicia en la superficie cuando la fuerza horizontal transmitida a través del aislador, F, excede la superficie de la fuerza de fricción, $F_{fi} = \mu_i W$, donde W es la carga vertical en el aislador. El deslizamiento es detenido por un controlador deslizante en la i th superficie cuando el desplazamiento relativo del control deslizante en esta superficie, u_i , se vuelve igual a la capacidad de desplazamiento, d_i. La fuerza lateral en el instante que el deslizador comienza a apoyarse en el dispositivo de contención de desplazamiento de esta superficie es:

$$F_{dri} = \frac{W}{R_{effi}} d_i + F_{fi} \quad (1)$$

La secuencia de activación y desactivación del deslizamiento en diversas superficies está determinada por la comparación de los valores relativos de F_{fi} y F_{dri}.

La configuración estándar del aislador TPF, está dada por radios efectivos grandes e iguales para las placas cóncavas externas y radios efectivos pequeños para las placas deslizantes internas, $R_{eff1} = R_{eff4} \gg R_{eff2} = R_{eff3}$. Los coeficientes de fricción se seleccionan para que el aislador presente inicialmente una alta rigidez y baja fricción; posteriormente disminuye en rigidez y aumenta la fricción efectiva, así como la amplitud de desplazamiento. Esto se logra mediante el uso de materiales de fricción que dan $\mu_1 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$. Las capacidades de desplazamiento de cada superficie son seleccionadas para que haya una rigidez gradual a grandes desplazamientos. El control deslizante debe contactar el limitador de desplazamiento en las superficies 1 y 4 antes de las superficies 2 y 3. Siempre que el movimiento inicie en las superficies 2 y 3 antes que las superficies 1 y 4, esto está garantizado siempre que $F_{f1} < F_{dr2}$ y $F_{f4} < F_{dr3}$. En términos de desplazamientos, esta condición es $d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2}$ y $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3}$. Además, el deslizamiento debería iniciar en la superficie de mayor fricción antes de la aparición de cualquier rigidez, siendo $F_{f4} < F_{dr1}$. Esto es para evitar una situación en la que el aislador se endurece, luego se ablanda y luego se endurece nuevamente, lo que ocurriría si $F_{dr1} < F_{f4}$. El rodamiento se endurecería al entrar en contacto con el limitador de desplazamiento de la superficie 1, suavizándose cuando el deslizamiento comience en la superficie 4, para luego volverse a poner rígido al entrar en contacto con el control deslizante de la superficie 4 (Fenz & Constantinou, 2008). A continuación se esquematiza al aislador tipo TPF en la figura 3.



Figura 3 Aislador Triple Péndulo Friccionante y componentes
Fuente: (EPS, 2009)

2.2. Relaciones Fuerza – Desplazamiento de un Aislador TPF

En este literal se demuestra cómo se deriva la relación Fuerza - Desplazamiento para un aislador de configuración estándar tipo TPF. Para este análisis, se asume que:

$$\boldsymbol{R_{eff2} = R_{eff3} \ll R_{eff1} = R_{eff4}} \tag{2}$$

$$\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4 \tag{3}$$

$$d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} \quad \text{y} \quad d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3} \quad \text{así que} \\ F_{f1} < F_{dr2} \quad \text{y} \quad F_{f4} < F_{dr3} \tag{4}$$

$$F_{f4} < F_{dr1} \tag{5}$$

3. EVIDENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LOS AISLADORES DE LA PILA No. 12 Y ESTADO DEL PUENTE "LOS CARAS"

El equipo técnico del CEE para la inspección del Puente "Los Caras", después del sismo de abril 2016, concluyó que las aceleraciones pico en roca en el puente, durante el sismo manifestado anteriormente, fueron de hasta 0,40 gravedades (PRA) para un periodo de recurrencia del sismo de 475 años, correspondiente al sismo básico de diseño (DBE) (Romo, 2018). El desplazamiento esperado en los aisladores sísmicos nuevos, para el sismo de diseño fue de 26 cm, sin considerar reducción de la fuerza sísmica. Esta característica es una de las condiciones importantes de diseño, ya que son parte de la estructura de hormigón armado y trabajan en conjunto con las pilas en las cuales se soportan estos aisladores.

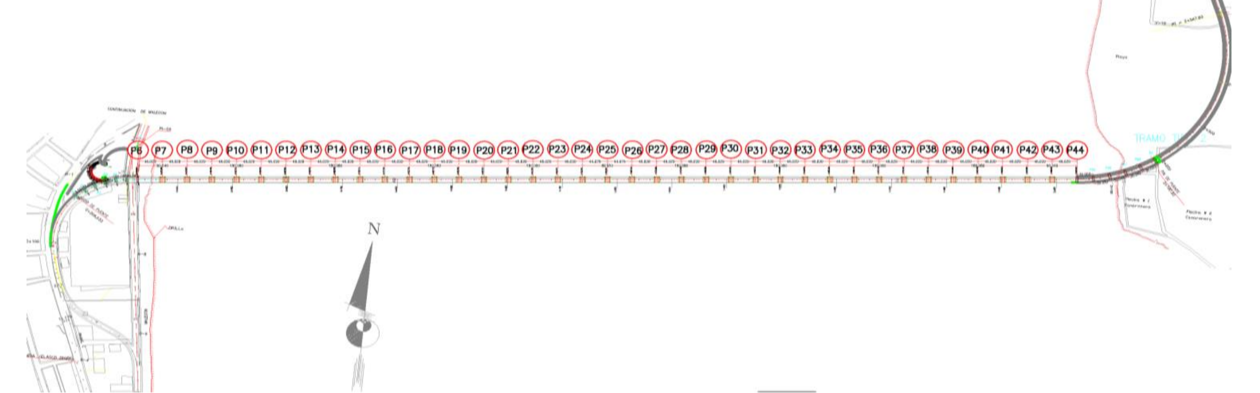
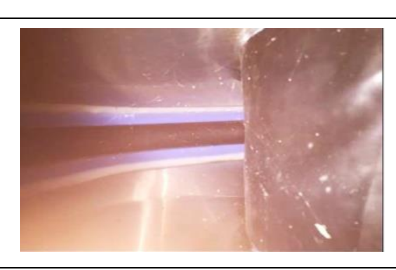


Figura 4 Distribución de las Pilas existentes en el Puente "Los Caras"
Fuente: (C.E.E., 2008)

Las evidencias anteriores se suman a la inspección específica, determinando que el apoyo hacia la cara lateral del puente, en la dirección Sur – Norte, muestra una deformación lateral mayor en aproximadamente un 50%. La pila No. 12 fue la única que mostró desplazamientos mayores, de acuerdo con los registros fotográficos y la información proporcionada por los técnicos del C.E.E. Los sistemas de aislamiento mostraron daños, debido a que las diferencias de desplazamiento promedio estaban en el rango de 15 cm en dirección norte y 30 cm en dirección sur como se muestra en la figura 5. Como se observa en la Figura 5 (h) la técnica de inspección visual fue uno de los principales métodos usados para evaluar y evidenciar posibles daños, así como también observar la condición general de la mayoría de los puentes (Phares, Rolander, Graybeal, & Washer, 2001). De acuerdo con la información del personal técnico del CEE, que participó en el diseño cuando se realizó el modelo de análisis, se incluyeron dos escenarios para el diseño de las pilas y los aisladores sísmicos, en función de su comportamiento: Sismo Básico de Diseño (DBE) y Sismo Máximo Considerado (MCE), cumpliendo la normativa nacional e internacional vigente para el efecto.

	
(a) Cubierta externa de las pilas y estado actual de la pila No.12	**(b)** Estado actual del aislador TPF (1), de la pila No. 12, como parte del sistema de aislamiento del Puente "Los Caras".
	
(c) Vista interna del desplazamiento del aislador No 1 de la pila No. 12 (GPS 0°36'33.58"S, 80°24'58.68"W). Fuente: (Romo, 2016)	**(d)** Estado actual de los aisladores No. 2 y 4 de la pila No. 12 del Puente "Los Caras"
	
(e) Estado Actual del aislador No. 1 de la Pila No. 12, con óxido en los pernos de anclaje	**(f)** Estado Actual del Aislador No. 2 de la Pila No. 12 con daño en la base de hormigón.

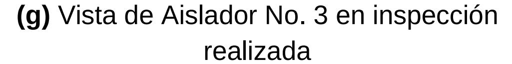
	
 **(g)** Vista de Aislador No. 3 en inspección realizada	**(h)** Autor del presente trabajo, realizando la revisión de los Aisladores de la Pila No. 12

Figura 5 Fotografías que sintetizan el comportamiento de los Regímenes de Deslizamiento del Aislador TPF

En función de la demanda para esta superestructura, obtenida a través del estudio de peligrosidad sísmica de la zona, se estableció el diseño de los aisladores sísmicos con sus características y propiedades geométricas, a fin de testearlos en los laboratorios de la fábrica oferente y luego contrastar estos resultados con los obtenidos del análisis numérico de diseño. En base a estos ensayos se puede comparar, que **el desplazamiento esperado para un sismo DBE, es de 35 cm; mientras que para un sismo MCE es de 52 cm.**

En la curva de histéresis de diseño que se encuentra en la figura 6, se puede visualizar el requerimiento de desplazamientos para los aisladores del Puente “Los Caras”. En el año 2008, esta curva fue enviada por parte de EPS y fue utilizada en el modelamiento estructural del Puente a través de la interacción suelo – estructura para un máximo desplazamiento de estos aisladores de 20,5plg (52cm). Sin embargo la fábrica remitió aisladores con un desplazamiento mayor de 23plg., como se observa en la figura 7.

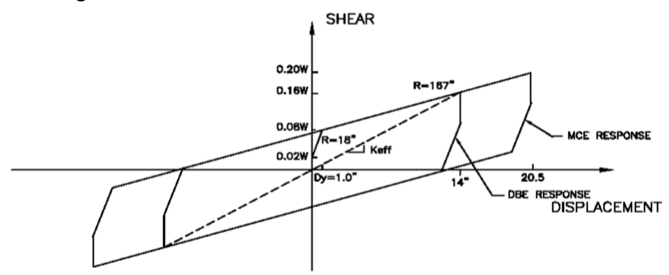


Figura 6 Curva de histéresis de las propiedades para el modelamiento estructural Fuente: (Romo, 2008)

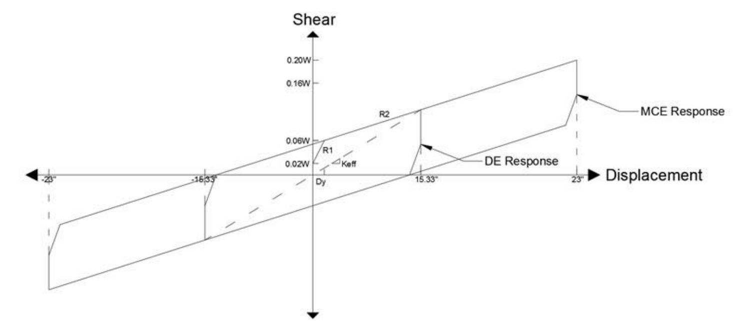


Figura 7 Curva de Histéresis de los aisladores fabricados por EPS para el sismo DBE y MCE

3.1. Desplazamientos medidos en los aisladores

La mayor aceleración que se produjo en el puente "Los Caras" durante el sismo de abril 2016, fue en la dirección transversal, esto produjo que un aislador de pila No.12 tenga el mayor desplazamiento de 52 cm como se puede observar en la Figuras 8 a y b. Es por esta razón que, de acuerdo a la investigación de las observaciones realizadas, se ha determinado que el desplazamiento máximo después del sismo de abril 2016, se dió en la Pila No.12; esto significa que de las 38 pilas que están directamente sobre el estuario del río Chone únicamente 01 pila tuvo el mayor desplazamiento, que representa el 2.6% de las 38 pilas. (Romo, 2016)

En la Figura 8 (c) se puede apreciar cómo fue el comportamiento de los tramos del puente y cómo los aisladores trabajaron bajo la superestructura, dando así los desplazamientos mencionados.

	
(a) Medidas del desplazamiento en el plato deslizante inferior del aislador No. 1 de la pila No.12 Fuente: (Romo, 2016)	**(b)** Medidas del desplazamiento interno del plato cóncavo inferior del aislador No.1 de la pila No.12 Fuente: (Romo, 2016)
	
(c) Modelo 3D del comportamiento de la superestructura sobre los aisladores en la pila No. 12 del puente "Los Caras" durante el sismo de abril, 2016.	**(d)** Estado del aislador No. 1 en la pila No. 12 del puente "Los Caras" después del sismo de abril, 2016.

Figura 8 Fotografías del estado de los aisladores luego del sismo del 16 de abril del 2016 e Imagen 3D que esquematiza el movimiento de la superestructura por el movimiento sísmico y la acción de los aisladores de la Pila No. 12

Existió poca diferencia en la medida de los desplazamientos de los 4 aisladores que existen en cada pila. Como se mencionó, mediante las inspecciones realizadas a los aisladores, la medida máxima de los desplazamientos en la dirección transversal durante el sismo del 16 de abril del 2016 se expone en la Tabla 1, de acuerdo a las pilas seleccionadas para el efecto:

Tabla 1 Máximo desplazamiento en los aisladores. Fuente: Romo (2016)

Pilas	Máximo desplazamiento medido (cm)
Pila 10	31.5
Pila 12	52.0
Pila 44	31.5

De acuerdo a la observación de los datos de medición de los aisladores del puente, se podría considerar que después del sismo de abril 2016, la diferencia importante entre el mayor desplazamiento calculado para el diseño y el máximo desplazamiento relativo medido, ocurrió en la pila No. 12 (27.5 cm calculado y 52 cm medido) (Romo, 2016).

La implementación de aisladores sísmicos como componentes que reduzcan los efectos de un sismo, integró otros mecanismos y soluciones constructivas para que se prevea un trabajo sincronizado, siendo así; el desplazamiento en los tramos del puente, se logró armonizar mediante la implementación de sincronizadores de movimiento y de un diseño óptimo de las juntas sísmicas que permitieron generar la independencia estructural de elementos, previsible con el diseño de los aisladores sísmicos; dividiendo al puente en tramos isostáticos que reduzcan la capacidad de generar momentos negativos en función de la demanda.

Estas juntas sísmicas, abarcaron conceptos estructurales de diseño como la dilatación de temperatura del hormigón, y otros fenómenos físicos que se producen generalmente por las propiedades de los materiales. El comportamiento de las juntas sísmicas son similares a las ubicadas en el Edificio del Centro de Investigación de Post Grados de la ESPE, en donde las aberturas dejadas permiten el desplazamiento de los bloques para acomodar movimientos causados por contracción, fluencia o cambios de temperatura (Aguiar, 2015).

Del resultado del monitoreo se pueden arrojar algunos detalles que son necesarios mencionar, tales como:

- La mayor parte de los aisladores sísmicos reflejaron pérdida del sello elastomérico de protección contra polvo y agentes externos del ambiente que deterioran a futuro la calidad del aislador, por las condiciones ambientales a las cuales están sometidos.

- De las observaciones directas por parte del personal técnico el promedio de los desplazamientos registrados para todas las pilas fue de 30 cm, para lo cual se presenta un diagrama comparativo de los desplazamientos de las pilas más relevantes, así como se observa en la figura 9 (Romo, 2017).

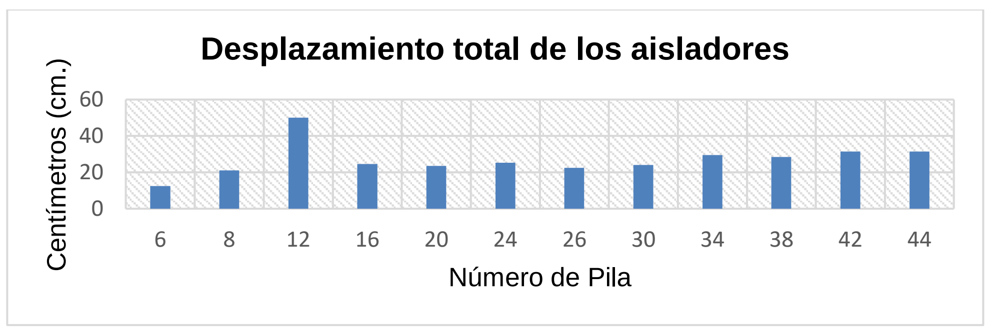


Figura 9 Desplazamiento en los aisladores sísmicos (cm)

El mínimo desplazamiento corresponde a la pila No. 6, y fue de 12,5 cm, mientras que el máximo desplazamiento lateral en los aisladores se produjo en pila No. 12, donde se registraron desplazamientos laterales en sus 4 aisladores, que superaron los 52 cm, este fenómeno permitió que los aisladores trabajaran al tope de su capacidad, llegando a causar daño en los bordes de este como se aprecia en la Figura 10 (a), (b), (c) y (d).



(a) Aislador TPF de la pila No.12 después del sismo de abril de 2016	**(b)** Interior del aislador de la pila No.12 en donde el control deslizante rígido entró en contacto con el conjunto deslizante articulado, causando daño.
(c) Borde externo de restricción del plato cóncavo inferior afectado en el aislador de la pila No. 12	**(d)** Fotografía que demuestra el daño de aisladores luego del sismo del 16 de Abril de 2016

Figura 10 Fotografías del estado actual de dos aisladores de la pila No12 en que se puede visualizar daño en sus componentes internos.

Al no existir registros de aceleraciones posteriores al evento sísmico del 16 de Abril del 2016, las evidencias del comportamiento del Aislador Sísmico de la pila No. 12 que se aprecia en la figura 11 (a) y (b), demuestra claramente que el sismo mencionado, se produjo en dirección transversal de Norte a Sur ya que al referenciar el daño del aislador, se puede concluir la dirección del movimiento.

	
(a) Referenciación de Aislador No 1 de la pila No.12	**(b)** Daño por falla de material al considerar el movimiento interno del péndulo hasta llegar al máximo desplazamiento.

Figura 11 Evidencia de la dirección del sismo del 16 de Abril de 2016, de acuerdo al daño presentado en el Aislador No. 1

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO TPF DEL PUENTE “LOS CARAS”

El sistema de aislamiento sísmico diseñado para el Puente “Los Caras”, está basado en un sistema TPF, en este caso se describirán las propiedades del aislador, generalizando los de la pila 12 como tipo.

4.1. Geometría:

La nomenclatura utilizada por EPS para identificar los aisladores es la siguiente: TPF$\mathrm{R_1 \emptyset_1 / b_4 - R_2 / b_2 -}$ H. Donde $\mathrm{R_1}$, $\mathrm{R_2}$ son los radios de las placas 1 y 2; $\emptyset_1$ es el diámetro de las superficies cóncavas 1 y 4; $\mathrm{b_4}$ es el diámetro del aislador interior; $\mathrm{b_2}$ es el diámetro del deslizador rígido; H es la altura interior del deslizador rígido.

Los cuatro aisladores que conforman la pila No. 12 del Puente “Los Caras”, poseen las siguientes dimensiones, según la Figura 12.

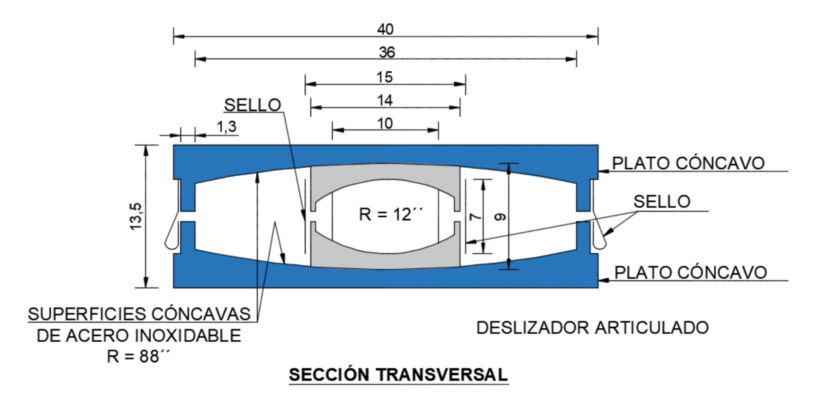


Figura 12 Corte de Sección de Aislador Sísmico del Puente “Los Caras”

4.2. Resultados de Pruebas de Aisladores:

Según la información proporcionada por EPS, se detalla la capacidad de los 152 aisladores tipo TPF 8836/14-12/10-7 instalados en el 2008, los mismos que fueron experimentalmente testeados sobre la base de los parámetros de diseño especificados en el análisis.

4.2.1. Capacidades y Requerimientos de Diseño

En la figura 6, se muestra la histéresis de diseño, en base a la cual se determinó la capacidad del aislador, con un desplazamiento máximo de 20.5 plg. Cabe indicar que los aisladores que fueron instalados según la información proporcionada por EPS (152 aisladores tipo TPF 8836/14-12/10-7 colocados en el 2008), tienen una capacidad máxima de 23 plg. Estos aisladores fueron experimentalmente testeados, y tienen los siguientes parámetros según la hoja técnica proporcionada por EPS.

1. Desplazamiento Lateral = 23 plg. ± 0,3 plg.
2. Carga Muerta Vertical Promedio = 600 Kips utilizados para pruebas de propiedades de aisladores
3. Capacidad de Carga Máxima Vertical D+L = 1200 Kips Máximo
4. Capacidad de Carga Máxima Vertical D+L+E = 1900 Kips Máximo
5. Las capacidades máximas de carga vertical se sustentan en las placas cóncavas de los aisladores que soportan hormigón de 5000 psi.
6. Capacidad Máxima de Rotación = ± 2 deg.

4.3. Resultados de Pruebas de Aisladores (Reemplazo en la pila No. 12):

Los cuatro aisladores que serán remplazados en la pila No. 12 del puente “Los Caras”, fueron ensayados tomando en cuenta los requerimientos iniciales del diseñador y tienen geometrías y coeficientes de fricción similares a las del diseño original. Los aisladores sísmicos TPF 8836/14-12/10-7, se sometieron a la prueba de control de calidad, que consistió en una prueba dinámica de compresión de tres ciclos con un desplazamiento de diseño lateral de 15 pulgadas. (aprox. 380 mm) y una carga vertical de 600 Kips (2678 kN)(EPS, 2016).

La prueba de aisladores, se realizó en las instalaciones de EPS mediante un equipo de prueba conforme los requerimientos establecidos en el Manual de Calidad EPS y la Certificación ISO 9001:2008. Las pruebas de aisladores se pueden realizar en una máquina de 15000 Kips de capacidad o en una máquina de prueba de 2000 Kips de capacidad, como se puede observar en la figura 13.

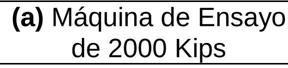
		
 **(a)** Máquina de Ensayo de 2000 Kips	**(b)** Platos y Células de Carga	**(c)** Sensor para medir el desplazamiento horizontal

Figura 13 Máquina de Ensayo de Aisladores Sísmicos tipo TPF
Fuente: (EPS, 2016)

Para cada TPF 8836/14-12/10-7, los valores de fricción del péndulo 1, del péndulo 2 y del péndulo 3, se verificaron para comprobar el cumplimiento de los criterios de aceptación. Los resultados de la prueba individual satisfacen los requisitos de los criterios de aceptación de propiedades de aisladores individuales. Los valores de fricción promedio de todos los aisladores de producción se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2 Valores de Fricción Promedio aplicados al Ensayo. Fuente EPS (2016)

Aislador	**Promedio de Aisladores Testeados**		
	μ1	**μ2**	**μ3**
TPF8836/14-12/10-7 Números de Serie 01 a 04	1.6%	7.2%	7.2%

Como se aprecia, todos los valores están dentro de los parámetros establecidos como requisitos de tolerancia y demuestran el cumplimiento de las propiedades de los aisladores, como carga vertical y cortante.

Los valores de fricción del péndulo 1, del péndulo 2 y del péndulo 3 se manifiestan como μ1, μ2, y μ3 respectivamente. Los valores de k_{eff}, β_{eff} y T_{eff} se indican en los gráficos detallados a continuación en las *Figuras 16, 17, 18 y 19*, en donde la energía desplazada por ciclo se enuncia como EDC. Estas figuras muestran demandas asociadas a las de diseño. Las pruebas se realizaron mediante desplazamientos cíclicos en la prueba de carga vertical especificada. Para cada desplazamiento, la rigidez efectiva se calcula a partir de la carga lateral, dividida por la carga vertical. Este valor se divide por el desplazamiento lateral obtenido (EPS, 2016).

El amortiguamiento se calcula a partir del área de los diagramas de fuerza y desplazamiento. Las propiedades de rigidez y amortiguamiento para cada prueba cumplen con el valor especificado como se determina a partir de los resultados promedio para el número de ciclos descritos (EPS, 2016).

4.3.1. Capacidades y Requerimientos de Diseño:

- Capacidad de Desplazamiento Lateral = Dtmc ±26.7 plg. (679mm); Dmc ± 22 plg. (559mm);
- Capacidad de Carga Vertical (Min): Elástica 3140 Kips (14018 kN) Min; Última 4710 Kips (21027 kN) Min.;
- Capacidad de Carga Cortante (Min): Capacidad de Carga Cortante Elástica no menor que 120 Kips (535 Kn), simultáneo con una carga vertical no menor a 600Kips (2678 kN); en desplazamientos laterales no menor que ± 22plg. (558mm);
- Capacidad de Carga Cortante Última no menor que 150 Kips (670 kN), simultáneo con una carga vertical no menor que 600 Kips (2678 kN).
- Capacidad de Rotación: Imponiendo ±2 grados de rotación angular de la superficie superior del aislador con relación a la superficie inferior, alrededor de cualquier eje de rotación cartesiano; el aislador debe soportar las capacidades combinadas de carga elástica vertical y de carga elástica cortante.
- Cuando el aislador es soportado en concreto confinado de 5000 psi (34 Mpa), la carga vertical estructural permisible, de acuerdo con la norma ACI 318-08 Sección 10.14 son: Pall=(D + L)=1250 Kips (5580 Kn); Pu=(12D+0,5L+E)=2400 Kips (10714 kN) a 20plg (508mm) de desplazamiento.

4.3.2. Coeficientes de Fricción para Aisladores TPF 8836/14-12/10-7

En la Tabla 3, se pueden apreciar los coeficientes de fricción nominales empleados en las tres pruebas de carga para los cuatro aisladores TPF, ensayados bajo diferentes condiciones de carga, llegando a obtener los valores de coeficientes de fricción promedio para que se cumplan las condiciones técnicas establecidas.

Tabla 3 Coeficientes de Fricción Promedio aplicados al Ensayo. EPS (2016)

Pruebas de control de calidad de producción	Tolerancia Individual	f1	f2	f3
	Min.	0.005	0.065	0.065
	Máx.	0.025	0.100	0.100

Carga de Prueba Objetivo 600 Kips

Aislador	Fricciones Individuales f1	f2	f3	Prueba de Carga (Kip)	Control de Tolerancia Individual f1	f2	f3
1	0.016	0.072	0.072	600	Pasa	Pasa	Pasa
2	0.017	0.072	0.072	592	Pasa	Pasa	Pasa
3	0.016	0.076	0.076	553	Pasa	Pasa	Pasa
4	0.015	0.068	0.068	595	Pasa	Pasa	Pasa

Fricciones Promedio f1	f2	f3	Tolerancia Promedio	f1	f2	f3
0.016	0.072	0.072	Min.	0.010	0.070	0.070
			Máx.	0.020	0.095	0.095
Control de Tolerancia Promedio						
Pasa	Pasa	Pasa				

En la Figura 14 se puede analizar el Diagrama de Histéresis del comportamiento de los Aisladores TPF luego de los ensayos realizados,

determinando desplazamientos ante sismos de diseño (15 plg.) y el máximo considerado (23 plg.). Estos desplazamientos son similares a los aisladores que inicialmente se instalaron en el puente.

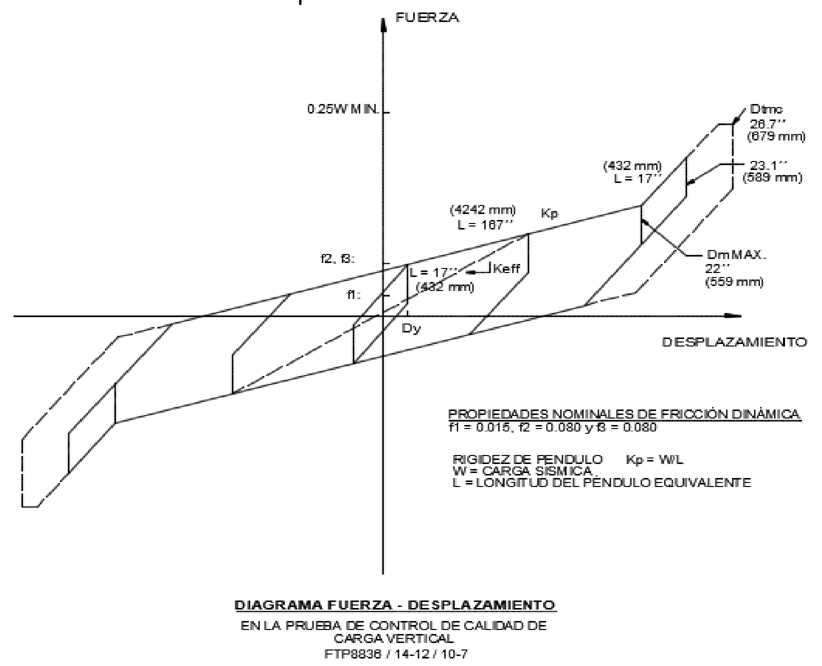


Figura 14 Diagrama de Histéresis (Fuerza – Desplazamiento) de ensayo
Fuente: (EPS, 2016)

4.4. Análisis Numérico de Aisladores TPF por Regímenes de Comportamiento

El sistema de aislamiento sísmico que fue adoptado para el Puente “Los Caras” es de tipo TPF, caracterizado por un complejo comportamiento basado en regímenes de fuerza - desplazamiento. Posee 12 parámetros geométricos y 4 parámetros friccionales que lo definen, como se puede apreciar en la figura 15.

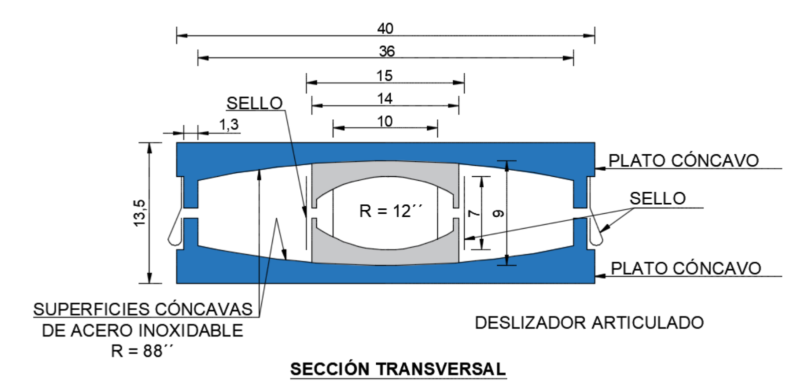


Figura 15 Corte de Sección de Aislador Sísmico empleado en el Puente “Los Caras”

En la Tabla 4 se presentan los parámetros geométricos de diseño para los aisladores sísmicos colocados en el puente "Los Caras", proporcionados por parte de la fábrica EPS.

Tabla 4 Parámetros Geométricos del Aislador TPF 8836/14-12/10-7

Parámetros	Valores
$R_1 = R_4$	88
$R_2 = R_3$	12
h_1	4,5
h_2	3,5
$d_1 = d_4$	11
$d_2 = d_3$	1,5

La carga sísmica (CM + % CV) es igual a 600kips.

4.5. Comportamiento de Fases:

El radio efectivo está dado por la fórmula:

$$R_{i,eff} = R_i - h_i \text{ , } para \ \ i = 1,2,3,4$$

$$R_{\,eff1=4} = R_1 - h_1 = 88 - 4{,}5 = 83{,}5$$

$$R_{\,eff2=3} = R_2 - h_2 = 12 - 3{,}5 = 8{,}5$$

La capacidad de desplazamiento de cada cara deslizante está dada por:

$$d_i^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i} * d_i, para \ i = 1,2,3,4$$

$$d_{1=4}^* = \frac{R_{\,eff1}}{R_1} * d_1 = \frac{83{,}5}{88} * 11 = 10{,}438$$

$$d_{2=3}^* = \frac{R_{\,eff2}}{R_2} * d_2 = \frac{8{,}5}{12} * 1{,}5 = 1{,}0625$$

Se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 5:

Tabla 5 Resumen de Parámetros Obtenidos

Parámetros	Valores
R_{eff1}=R_{eff4}	83,5
R_{eff2}=R_{eff3}	8,5

$d_1^*=d_4^*$	10,438
$d_2^*=d_3^*$	1,0625

4.5.1. Régimen de Análisis Fase I

Comienza desde el reposo, el deslizamiento inicia en la superficie cuando la fuerza horizontal transmitida a través del aislador, F, excede la superficie de la fuerza de fricción:

$$F_{fi} = \mu_i * W$$

Dónde: F_f = Fuerza de Fricción, i=1,2,3,4; μ_i = Coeficiente de Fricción;W es la carga vertical en el Aislador

Al respecto, se consideraron los coeficientes de fricción promedio, señalados en el Reporte de Ensayos Dinámicos realizados a los aisladores sísmicos por parte de EPS; sin embargo, el valor del coeficiente de fricción nominal μ_4, se lo mayoró en un 10% del establecido para μ_1, a fin de que se pueda cumplir con el análisis ideal de cada uno de los regímenes de comportamiento establecido en el modelo de la serie teórica de Fenz y Constantinou, en la que la condición que se busca aplicar con los coeficientes de fricción es: $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$. Esta condición permite modelar el comportamiento de los aisladores TPF, en todos los regímenes de operación, siempre que se apliquen los supuestos básicos de la teoría antes citada (Sarlis & Constantinou, 2013).

Hasta ahora, el comportamiento del aislador TPF se ha descrito para la configuración totalmente adaptable de propiedades en las que $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$. En este caso, existen múltiples fases deslizantes y, en consecuencia, múltiples cambios en la rigidez. Las configuraciones más simples son las más probables de ser implementadas para contextualización y comprensión del funcionamiento. (Fenz & Constantinou, 2006).

En la Tabla 6, se presentan los coeficientes de fricción a ser empleados en el análisis numérico del comportamiento de los aisladores tipo TPF del puente “Los Caras”.

Tabla 6 Datos de Coeficientes de Fricción empleados para el análisis

Carga	Numero de aisladores	μ1	μ2	μ3	μ4
600	4	0.08	0.015	0.015	0.088

Una vez que se determinaron los coeficientes de fricción, se calculan las Fuerzas de Fricción correspondientes al sistema:

$$F_{f1} = \mu_1 * W = 0,08 * 600 F_{f1} = 48 Kips$$

$$F_{f2=3} = \mu_{2=3} * W = 0,015 * 600 = 9 Kips$$

$$F_{f4} = \mu_4 * W = 0,088 * 600 = 52,8 Kips$$

A continuación, se procede con el cálculo de la Fuerza en el instante que el deslizador comienza a apoyarse en el dispositivo de contención de desplazamiento:

$$F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} * d_1 + F_{f1} = \frac{600}{83{,}5} * 11 + 48 = 127{,}042$$

$$F_{dr2=3} = \frac{W}{R_{eff2=3}} * d_2 + F_{f2} = \frac{600}{8{,}5} * 1{,}5 + 9 = 114{,}882$$

$$F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} * d_4 + F_{f4} = \frac{600}{83{,}5} * 11 + 52{,}8 = 131{,}842$$

Posteriormente, se procede a calcular la Fuerza Lateral equivalente de acuerdo con la primera fase de deslizamiento, analizando la superficie 1:

$$F = F_{f1}$$
$$F = 48Kips$$

Para comprobar este análisis se asume que el desplazamiento relativo u_2, es suficientemente pequeño comparado con el radio efectivo R_{eff2}, por lo que, se obtiene el siguiente valor en la superficie 2:

$$u_2 = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} = (0{,}08 - 0{,}015) * 8{,}5 = 0{,}5525$$

Aplicando la Ecuación descrita en la figura 4, se puede comprobar que la Fuerza entre los Regímenes I y II, está dada por:

$$F = \frac{W}{R_{eff2}} u_2 + F_{f2} = \frac{600}{8{,}5} * 0{,}5525 + 9 = 48Kips$$

Para calcular el desplazamiento de Transición entre el Régimen I y el Régimen II, se debe considerar que:

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{eff3} = (0{,}08 - 0{,}015) * 8{,}5 + (0{,}08 - 0{,}015) * 8{,}5 = 1{,}105plg$$

La relación Fuerza - Desplazamiento Total para el aislador durante el Régimen de Deslizamiento I viene dado por:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff2} + R_{eff3}}$$

En donde, se emplea para el valor de $u = u^*$

$$F = \frac{600}{8{,}5 + 8{,}5} * 1{,}105 + \frac{9 * 8{,}5 + 9 * 8{,}5}{8{,}5 + 8{,}5} = 48Kips$$

En la Figura 16, se muestra la curva de histéresis del Régimen I, donde la Fuerza está divida para la carga.

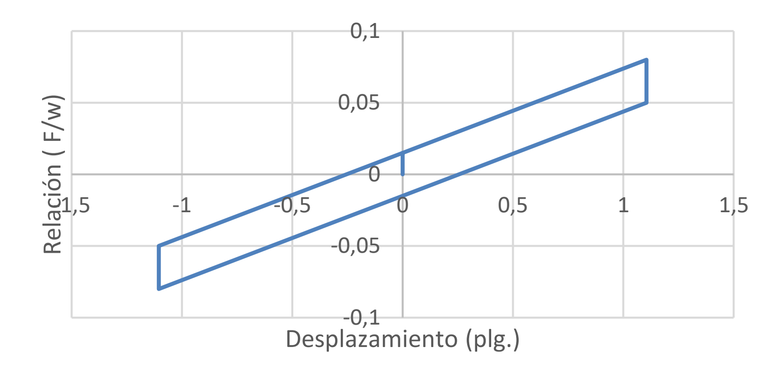


Figura 16 Diagrama de Histéresis del Régimen I para el aislador TPF8836/14-12/10-7

4.5.2. Régimen de Análisis Fase II

Cuando $\mathrm{F} = \mathrm{F}_1$, el movimiento comienza en la superficie 1 y se marca la transición para el inicio del Régimen de Desplazamiento II.

Para calcular el desplazamiento de Transición entre el Régimen II y el Régimen III se debe considerar que:

$$u^{**} = u^{*} + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3}) = 1{,}105 + (0{,}088 - 0{,}08)(83{,}5 + 8{,}5) = 1{,}841 plg$$

A continuación, se procede a obtener el valor de la Fuerza Lateral Equivalente de acuerdo con el siguiente detalle:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f1}\left(R_{eff1} - R_{eff2}\right) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}}$$

$$F = \frac{600}{83{,}5 + 8{,}5} * 1{,}841 + \frac{48(83{,}5 - 8{,}5) + 9 * 8{,}5 + 9 * 8{,}5}{83{,}5 + 8{,}5} = 52{,}8 Kips$$

Para el análisis del desplazamiento relativo de la Superficie 3 se tiene

$$u_3 = (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3} = (0{,}088 - 0{,}015) * 8{,}5 = 0{,}6205$$

Aplicando la fórmula para esta fase descrita en la *Figura4*, se puede probar que la fuerza entre los Regímenes II y III está dada por:

$$F = \frac{W}{R_{eff3}} u_3 + F_{f3} = \frac{600}{8{,}5} * 0{,}625 + 9 = 52{,}8 Kips$$

En la Figura 17, se muestra la curva de histéresis fuerza deformación del régimen II.

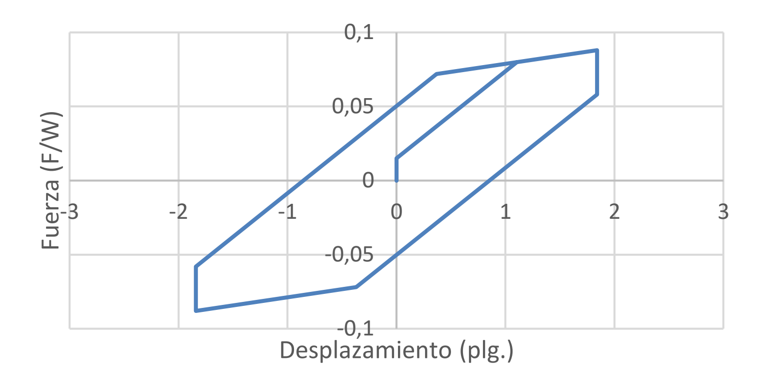


Figura 17 Diagrama de Histéresis del Régimen II para el aislador TPF 8836/14-12/10-7

4.5.3. Régimen de Análisis Fase III

El deslizamiento se inicia en la superficie 4 cuando $F = F_{f4}$, ocurriendo el desplazamiento u^{**} dado por la transición existente entre el Régimen II y el Régimen III, que se calculó anteriormente:

Como desplazamiento de transición entre el límite del Régimen III y IV se tiene que:

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1\left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}}\right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4})$$

$$u_{dr1} = 1{,}841 + 11\left(1 + \frac{83{,}5}{83{,}5}\right) - (0{,}088 - 0{,}08)(83{,}5 + 83{,}5) = 22{,}505$$

En este sentido, se procede a obtener la relación fuerza - desplazamiento con la fórmula expuesta a continuación; la que caracteriza la reducción de la rigidez y aumento de la fricción efectiva de acuerdo al siguiente detalle:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3} + F_{f4}(R_{eff4} - R_{eff3})}{R_{eff1} + R_{eff4}}$$

$$F = \frac{600}{83{,}5 + 83{,}5} * 22{,}505 + \frac{48(83{,}5 - 8{,}5) + 9 * 8{,}5 + 9 * 8{,}5 + 52{,}8 * (83{,}5 - 8{,}5)}{83{,}5 + 83{,}5}$$
$$= 127{,}042 Kips$$

En la figura 18 se muestra la curva de histéresis del régimen III.

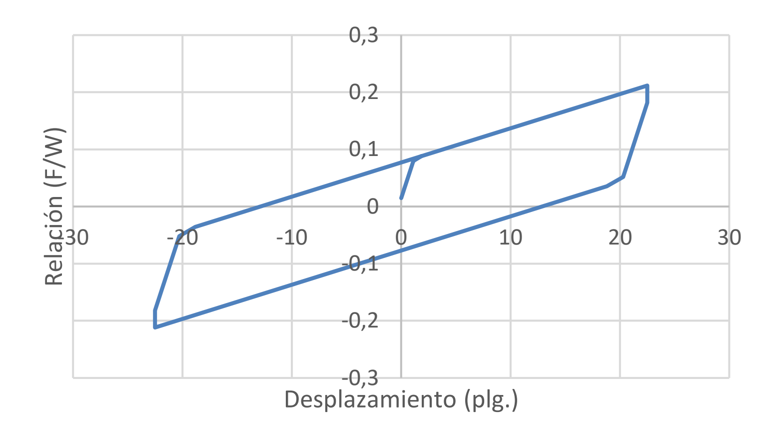


Figura 18 Diagrama de Histéresis del Régimen III para el aislador TPF 8836/14-12/10-7

4.5.4. Régimen de Análisis Fase IV

El movimiento continúa en las superficies 1 y 4, hasta que se consume la capacidad de desplazamiento en la superficie 1 y el deslizador móvil entra en contacto con el limitador de la superficie 1. El desplazamiento máximo de transición entre el Régimen IV y V, se presenta de acuerdo al siguiente detalle:

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4\right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1\right)\right](R_{eff2} + R_{eff4})$$

$$u_{dr4} = 22{,}505 + \left[\left(\frac{11}{83{,}5} + 0{,}088\right) - \left(\frac{11}{83{,}5} + 0{,}08\right)\right](8{,}5 + 83{,}5) = 23{,}241 plg$$

A continuación, se procede a obtener la relación fuerza - desplazamiento, de acuerdo al siguiente detalle:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}}(u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$$

$$F = \frac{600}{8{,}5 + 83{,}5}(23{,}241 - 22{,}505) + \frac{600}{83{,}5} * 11 + 48 = 131{,}842 Kips$$

En la figura 19, se muestra la curva de histéresis del régimen IV donde la Fuerza está divida para la carga.

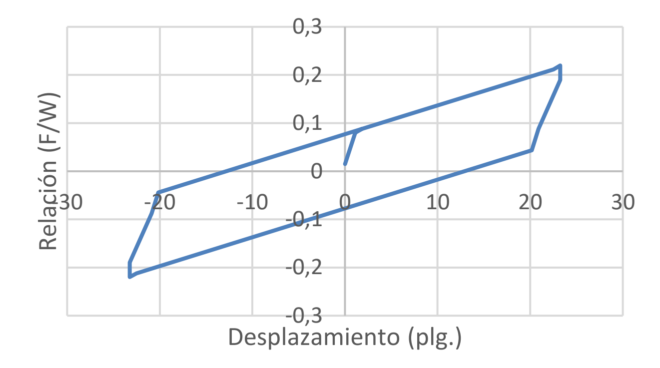


Figura 19 Diagrama de histéresis del Régimen IV para el aislador TPF 8836/14-12/10-7

4.5.5. Régimen de Análisis Fase V

$$u_{max} = 2 * d_1^* + 2 * d_2^* = 2 * 10{,}438 + 2 * 1{,}063 = 23plg$$

En este caso, se considerará según los resultados de la prueba del fabricante una mayoración de +0,3plg., a fin de analizar el comportamiento histerético en este régimen en referencia al desplazamiento de transición del anterior régimen.

$$u_{max} = 23{,}3plg$$

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}}(u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4}$$

$$F = \frac{600}{8{,}5 + 8{,}5}(23{,}3 - 23{,}241) + \frac{600}{83{,}5} * 11 + 52{,}8 = 133{,}924Kips$$

En la figura 20 se muestra la curva de histéresis del Régimen V donde la Fuerza está divida para la carga.

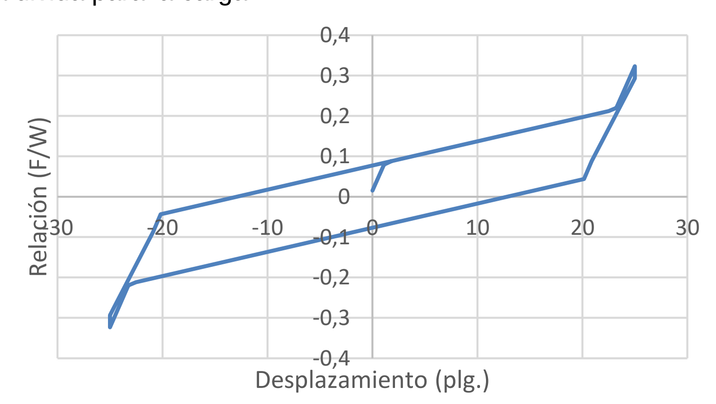


Figura 20 Diagrama de histéresis del Régimen V para el aislador TPF 8836/14-12/10-7

4.6. Resumen de Regímenes de Desplazamiento en los Aisladores Sísmicos de la Pila No. 12.

En la figura 21 se determinan las cinco fases del aislador tipo TPF 8836/14-12/10-7, instalados en el 2008; modelados en base a la teoría descrita en el capítulo II. En la Tabla 11 se determinan los parámetros de EDC = Energía disipada por ciclo ; $\mathrm{k_{eff}}$ = Rigidez Efectiva; $\mathrm{\beta_{eff}}$ = Amortiguamiento Efectivo; $\mathrm{F_{maxh}}$ = Fuerza Máxima Horizontal y $\mathrm{u_{maxh}}$ = Máximo Desplazamiento Horizontal.

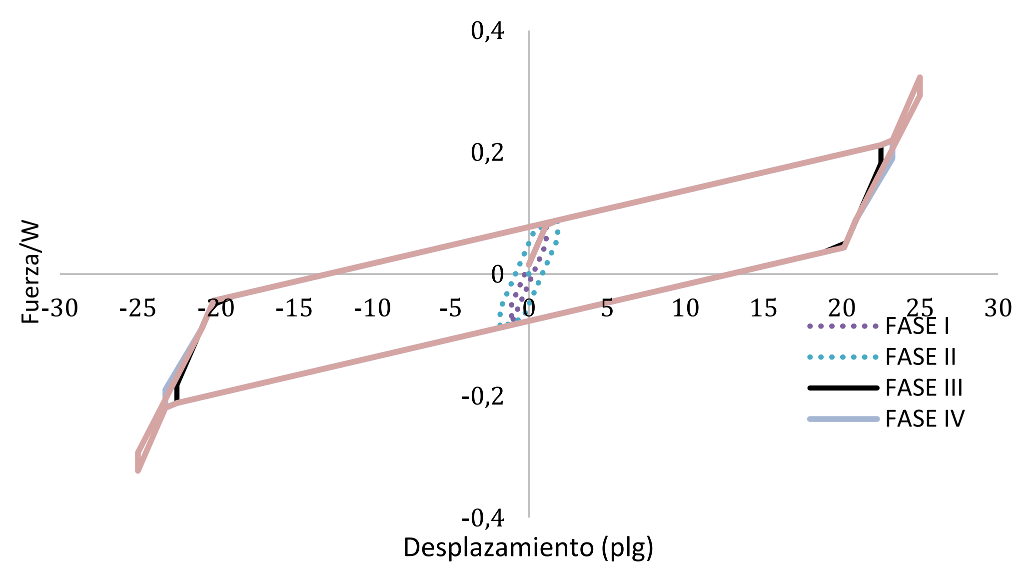


Figura 21 Diagrama de Histéresis con cinco fases del Aislador Sísmico Empleado en el Puente “Los Caras”

Tabla 7 Prueba de Control de Calidad

Aislador	Fase	F_{maxh} (%W) Kips	u_{maxh} plg	EDC (kips-plg)	k_{eff} (kips/plg)	β_{eff} (%)
	1	0.08	1.11	0.07	0.07	23.87
	2	0.09	1.84	0.32	0.05	62.67
Pila 12	3	0.21	22.51	6.74	0.01	45.05
	4	0.22	23.24	6.85	0.01	42.70
	5	0.32	25.00	6.89	0.01	27.15

Fuente: (EPS, 2007)

Analíticamente se puede observar en la figura 21, que la curva Fuerza - Deformación tiene características histeréticas y de la Tabla 7 se puede indicar las siguientes observaciones:

- La rigidez efectiva en las dos primeras fases es mayor que en las fases III, IV y V;
- La rigidez efectiva de las fases III, IV y V es 0.01 (kips/plg);
- La Energía disipada en los tres últimas fases es significativamente mayor a las dos primeras;
- El desplazmiento máximo horizontal está asociado a las fases III y IV(23 plg. ± 0,3 plg.);
- La fuerza horizontal de diseño es 0.20 W.

5. PRUEBA CONTROLADA DE DESPLAZAMIENTO MEDIANTE SOFTWARE 3PLEANI

Con la finalidad de explicar el modelamiento de un aislador con sus propiedades, se aplica un desplazamiento de 1 ciclo sinusoidal con un periodo de 6 segundos y amplitud de acuerdo con los regímenes especiales y con el análisis numérico. El peso vertical se especifica como 600 kips.

Para el análisis en el software 3pleANI se presenta la figura 22, que indica la ventana donde se ingresa los parámetros de diseño del aislador sísmico. Nótese que para el ingreso de los coeficientes de fricción se considera un análisis independiente de la velocidad. Este software tiene la capacidad de mostrar las curvas de histéresis de Fuerza - Desplazamiento como se ve en la figura 23.

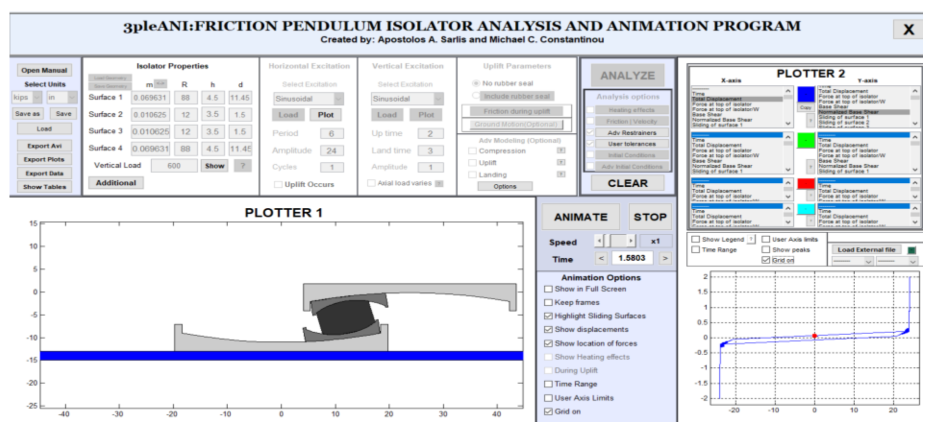


Figura 22 Imágenes del Puente "Los Caras" y su diseño estructural con aisladores sísmicos.

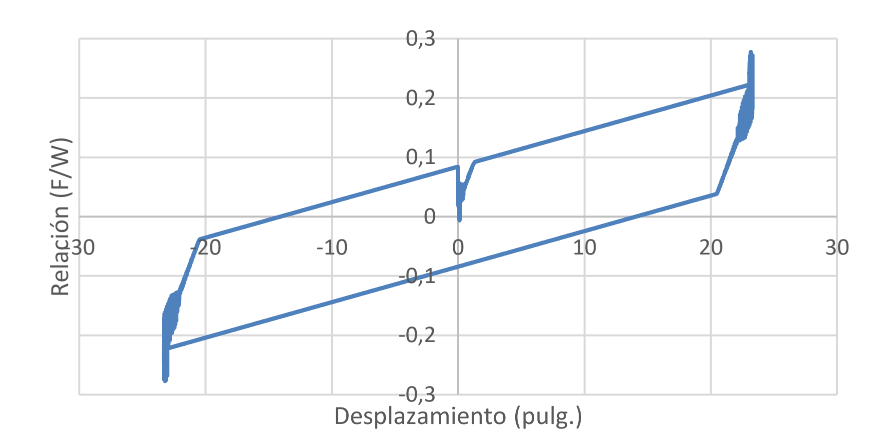


Figura 23 Ejemplo de la Curva de Histéresis del Aislador TPF8836/14-12/10-7 con una amplitud de 23 plg.

5.1. Análisis de los cinco regímenes del aislador TPF8836/14-12/10-7 que se encuentra en el puente "Los Caras".

El aislador TPF tiene un comportamiento complejo con varios regímenes de comportamiento. Mientras el desplazamiento se incrementa, existen múltiples cambios en la rigidez y la fuerza. Generalmente, cuando los niveles de fuerza y desplazamiento son bajos el sistema es muy rígido, comparado con un nivel de diseño donde existe rigidez más baja, para luego tener un comportamiento diferente en el evento máximo considerado donde existe mayor rigidez para controlar el desplazamiento. Esto da lugar a un sistema adaptativo que puede ser optimizado para varios niveles de rendimiento (McVitty & Constantinou, 2015).

A continuación, se presentan los diagramas de histéresis arrojados por el software 3pleANI los que serán presentados en los diferentes regímenes para posteriormente comparar con los obtenidos analíticamente.

5.1.1. Régimen I

Este régimen consiste en el análisis del deslizamiento en las superficies 2 y 3, sin que el mismo avance a las superficies 1 y 4, para lo cual, el movimiento comienza desde el reposo, cuando la fuerza horizontal excede a la fuerza de fricción en la superficie de menor fricción. En la figura 24 se muestra los parámetros que se ingresó para el modelamiento.

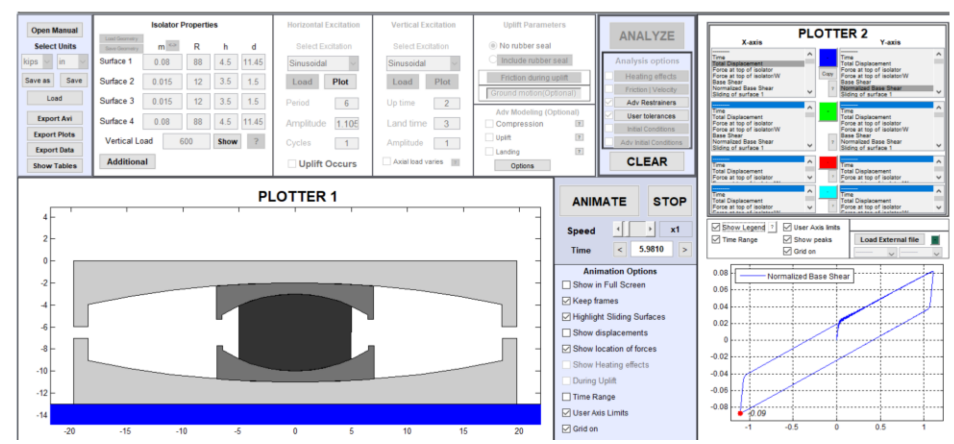


Figura 24 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen I.
Fuente: Cortesía Constantinou 2018

Para obtener los valores de la figura 25, se tomaron los valores de desplazamiento y fuerza para ser exportados a una hoja de cálculo Excel y así obtener la curva de histéresis para el régimen I.

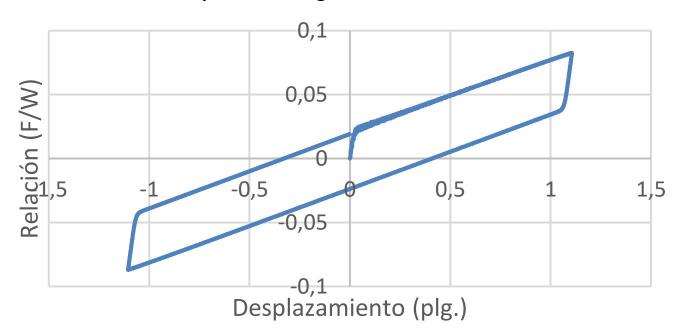


Figura 25 Curva de Histéresis Régimen I

5.1.2. Régimen II

Este régimen comienza con el deslizamiento en la superficie 1, marcando el inicio del Régimen II. En la figura 26 se muestra una visualización de la interface 3pleANI en esta fase.

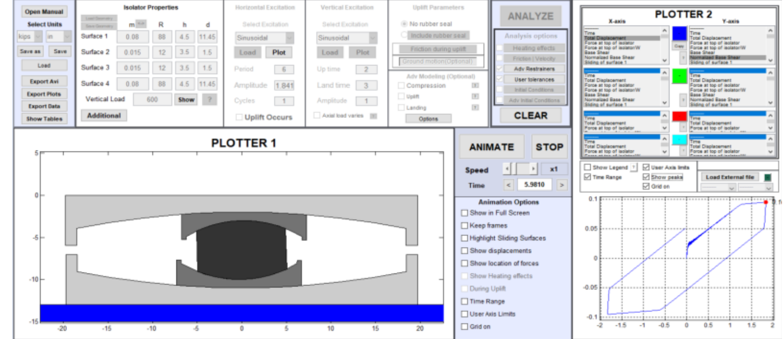


Figura 26 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen II.
Fuente: Cortesía Constantinou 2018

Para obtener los valores de la figura 27, de igual manera los valores de desplazamiento y fuerza son exportados a una hoja de cálculo Excel, con el fin de graficar la curva de histéresis para el régimen II. Los valores pico de fuerza llegan a 0.1 en el modelamiento de la curva de histéresis.

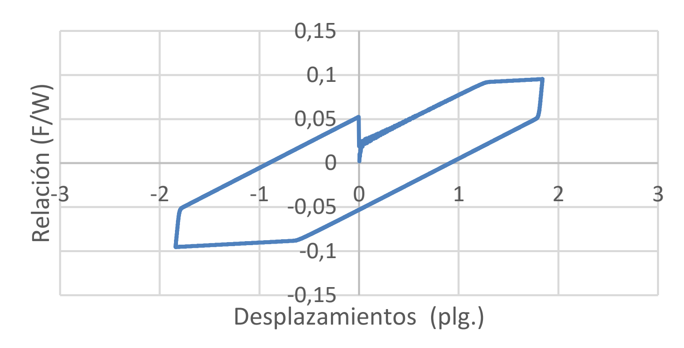


Figura 27 Curva de Histéresis Régimen II

5.1.3. Régimen III

Para este régimen el deslizamiento se inicia en la superficie 4. En la figura 28 se muestra una visualización de la interface 3pleANI en esta fase.

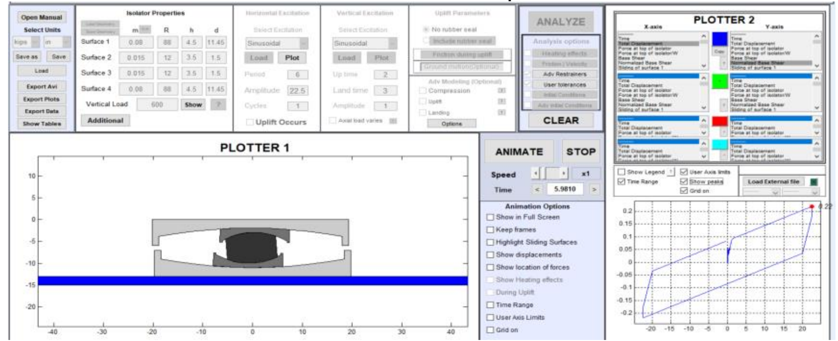


Figura 28 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen III.
Fuente: Cortesía Constantinou 2018

Para obtener los valores de la figura 29, se tomaron los valores de desplazamiento y fuerza para ser exportados a una hoja de cálculo y así obtener la curva de histéresis para el régimen III.

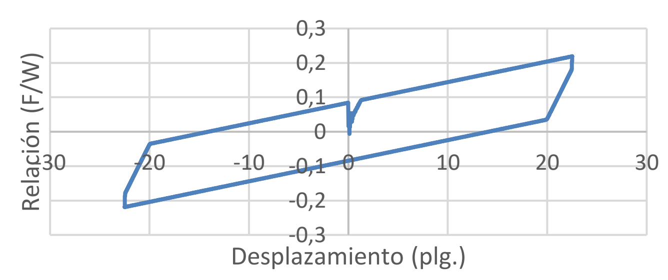


Figura 29 Curva de Histéresis Régimen III

5.1.4. Régimen IV

El régimen de deslizamiento IV comienza cuando el contacto se realiza con el limitador de desplazamiento en la superficie 1, cambiando los deslizamientos desde las superficies 1 y 4 a las superficies 2 y 4. De igual forma los parámetros son ingresados al software de diseño, como se puede ver en la figura 30

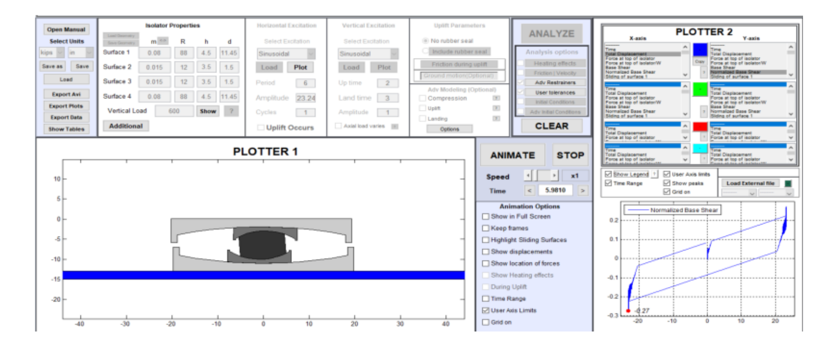


Figura 30*2* Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen IV.
Fuente: Cortesía Constantinou (2018)

Para obtener los valores de la figura 31, se siguió el mismo procedimiento detallado anteriormente, obteniendo la curva de histéresis para el régimen IV. Los valores pico de fuerza llegan a 0.23 en el modelamiento de la curva de histéresis.

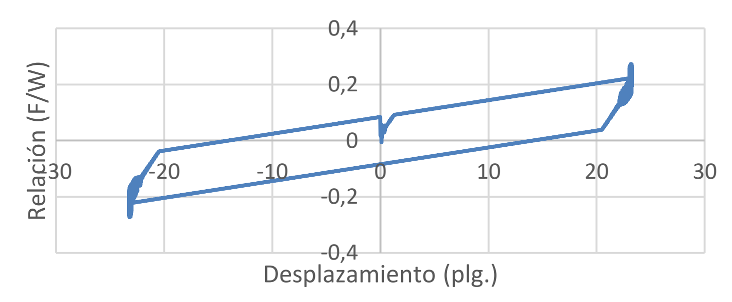


Figura 31 Curva de Histéresis Régimen IV

5.1.5. Régimen V

El régimen de deslizamiento V comienza cuando se hace contacto con el limitador de desplazamiento en la superficie 4. Los cambios de movimiento desde el deslizamiento en las superficies 2 y 4 hasta el deslizamiento en las superficies 2 y 3, están acompañados por una mayor rigidez.

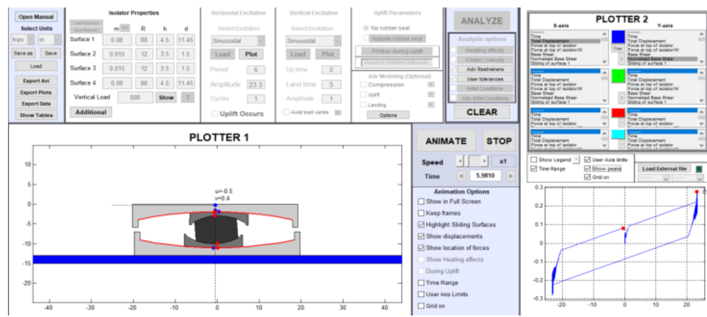


Figura 32 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen V.
Fuente: Cortesía Constantinou (2018)

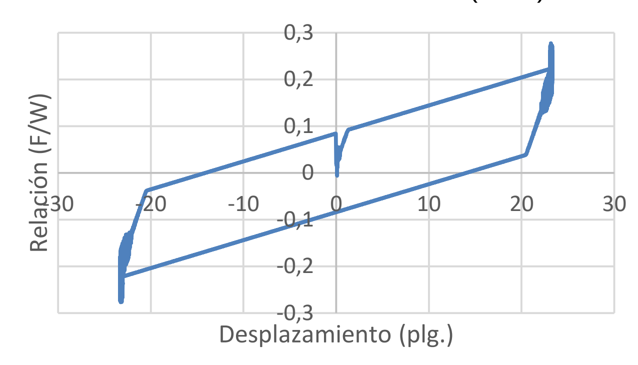


Figura 33 Curva de Histéresis Régimen V

En la Figura 34 se muestra el último régimen con el desplazamiento máximo.

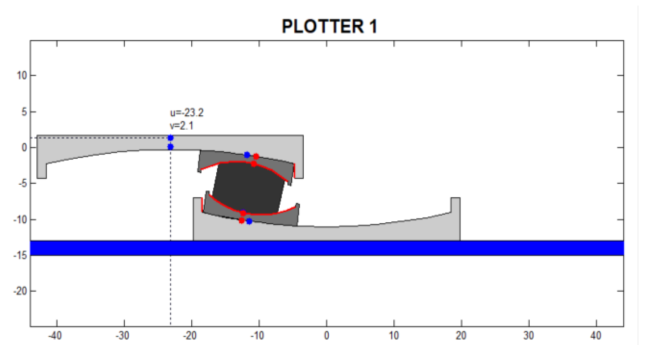


Figura 34 Modelamiento del régimen V. Se aprecia el contacto del núcleo interior con los limitadores de movimiento por el máximo desplazamiento del aislador TPF8836/14-12/10-7

Al comparar los diagramas de histéresis obtenidos con el modelo numérico y el modelamiento con el software 3pleANI, se puede visualizar los diferentes parámetros en cada régimen de las figuras 35 y 36.

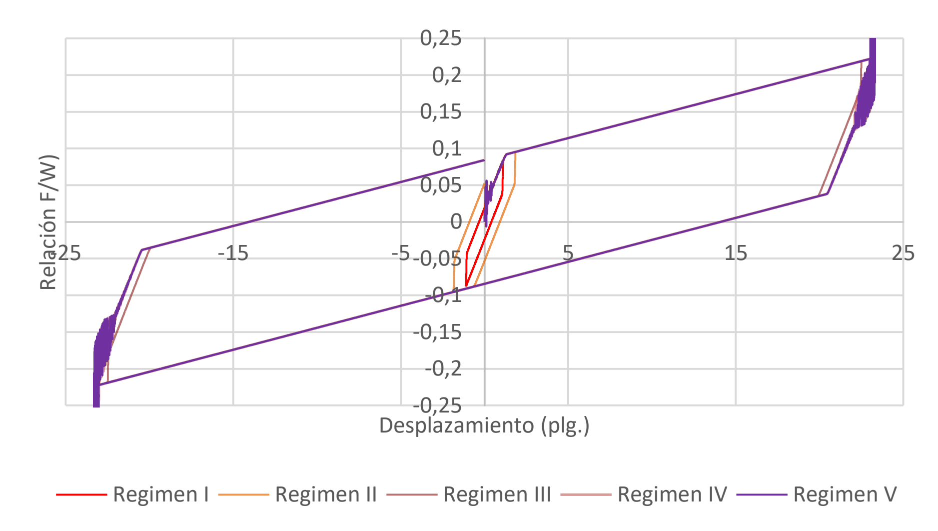


Figura 35 Curva de histéresis para los cinco regímenes de desplazamiento de acuerdo con el software 3pleANI.

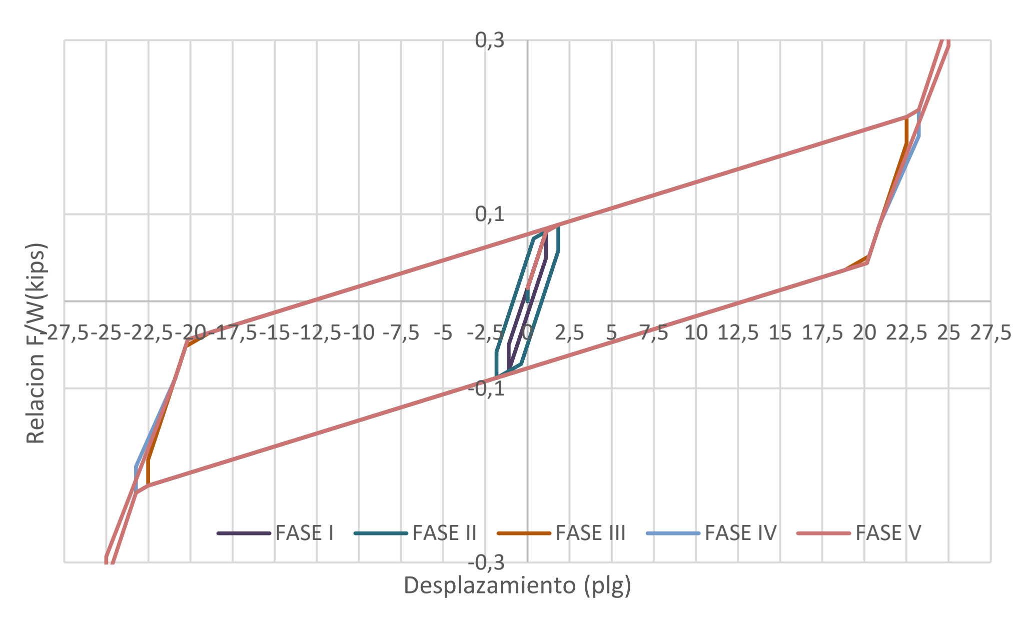
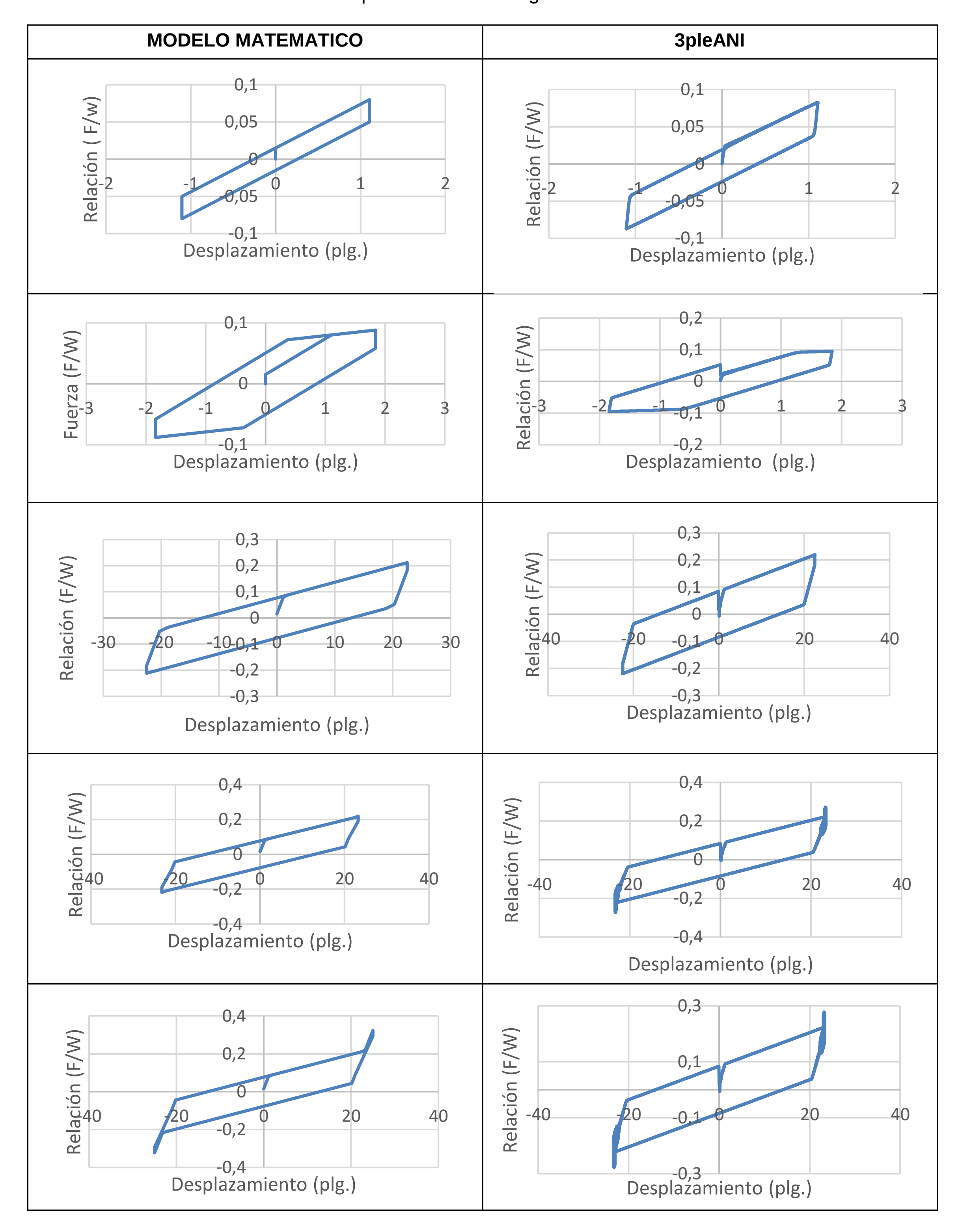


Figura 36 Curva de histéresis para los cinco regímenes de desplazamiento de acuerdo con el modelamiento numérico.

Tabla 8 Resumen de las curvas de histéresis del modelo matemático y modelo en 3pleANI en los 5 regímenes.



En las Tablas 12 y 13 se describe los siguientes parámetros: EDC = Energía disipada por ciclo; k_{eff} = Rigidez Efectiva; β_{eff} = Amortiguamiento Efectivo; F_{maxh} = Fuerza Máxima Horizontal y u_{maxh} = Máximo Desplazamiento Horizontal.

Tabla 9 Parámetros Obtenidos Mediante el Análisis Numérico.

Aislador	Fase	F_{maxh} Kips	u_{maxh} plg.	EDC (kips-plg)	k_{eff} (kips/plg)	β_{eff} (%)
Pila 12	1	0.08	1.11	0.07	0.07	23.87
	2	0.09	1.84	0.32	0.05	62.67
	3	0.21	22.51	6.74	0.01	45.05
	4	0.22	23.24	6.85	0.01	42.70
	5	0.32	25.00	6.89	0.01	27.15

Tabla 10 Parámetros Obtenidos Mediante la Interface 3pleANI.

Aislador	Fase	F_{maxh} Kips	u_{maxh} plg	EDC (kips-plg)	k_{eff} (kips/plg)	β_{eff} (%)
Pila 12	1	0.08	1.10	0.09	0.08	31.82
	2	0.10	1.84	0.28	0.05	50.22
	3	0.22	22.50	7.21	0.01	46.57
	4	0.27	23.24	7.41	0.01	37.21
	5	0.28	23.30	7.41	0.01	36.49

Se puede observar en las Figuras 35 y 36 que la curva fuerza - deformación tiene características histéricas, es decir, que el máximo valor de la fuerza coincide con el máximo desplazamiento. En base a las Tablas 9 y 10, se puede indicar las siguientes observaciones, que corresponden a las propiedades mecánicas de los aisladores:

- Las dos tablas muestran propiedades mecánicas consistentes, es decir, se realizó una validación con la interfase del proceso analítico;
- La rigidez efectiva de las fases III, IV y V es 0.01 (kips/plg);
- Se puede observar que en la columna de amortiguamiento efectivo β_{eff} , existe alguna variación.
- A partir del regimen III, la EDC alcanza los mayores valores.

6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El diseño del puente alcanzó niveles de protección que permitieron mantener una funcionalidad continua y total operatividad, durante y después del terremoto mencionado anteriormente, a pesar de que en Bahía se tuvieron aceleraciones pico estimadas, del orden del 90% de la gravedad en suelos horizontales (PGA).

Se analiza el sistema de funcionamiento de los aisladores de base tipo TPF para conocer las fases y parámetros de comportamiento de acuerdo con sus principios físicos, estáticos y dinámicos; presentando las ecuaciones que permiten llegar al análisis de histéresis fuerza - desplazamiento, en cada una de las fases.

Se detallan geometrías y características del aislador tipo, tanto de diseño inicial como de aquellas previstas para el reemplazo, facilitadas por parte de la empresa EPS. Estos parámetros son utilizados para presentar las curvas fuerza - deformación de los aisladores instalados en el puente y compararlos con los ensayos realizados por el fabricante.

Se presenta un análisis mediante modelamiento analítico y empleando la interface 3pleANI, que permite validar e interpretar, sobre la base de los coeficientes de fricción, parámetros de diseño y diagramas de histéresis, las propiedades mecánicas del desempeño del aislador TPF8836/14-12/10-7.

No existen registros sísmicos del evento del 2016, de la ciudad de Bahía de Caráquez, donde está ubicado el proyecto. Se perdió una gran oportunidad de entender la real amenaza de esta ciudad, que históricamente ha sido afectada por eventos telúricos. Se realizó una medición de los desplazamientos en los aisladores ante el evento sísmico del 2016 que permite contar con datos reales para comprender cuál fue la demanda existente.

7. REFERENCIAS

Aguiar R, Almazan J, Dechant P, Suarez V. (20008). “Aisladores de Base elastomericos y FPS”. Quito: Centro de Investigaciones Cientificas Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Aguiar, R & Guaygua, B. (2015) Análisis de dos Alternativas en el Bloque Estrutural dos con Aisladores FPS de la Tercera Generación del Nuevo Centro de Investigaciones de la UFA-ESPE. Revista Ciencia, 407-423

Buckle, I. G., Constantinou, M. C., Diceli, M., & Ghasemi, H. (2006). *Seismic isolation of highway bridges*. Retrieved from

C.E.E. (2008). Implantación de Cimentación - Tramo Central. In 392TC-01A (Ed.). Julio 2008: Cuerpo de Ingenieros del Ejército.

E.P.N. (2016). *Informe Sísmico Especial No. 7 - 2016* (7). Retrieved from Quito: http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1311-informe-sismico-especial-n-7-2016

Purchase Agreement for the Supply of Friction Pendulum Bearings for Rio Chone Bridge, Ecuador, (2007).

EPS. (2009). Product Brochure Page Version. In I. Earthquake Protection Systems (Ed.). California.

EPS. (2016). *Production Bearing Quality Control Test Report for Rio Chone Bridge Replacement Bearings, Ecuador*. Retrieved from California - USA:

Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2006). Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings.

Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008). Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory. *Earthquake engineering & structural dynamics, 37*(2), 163-183.

McVitty, W., & Constantinou, M. (2015). Property modification factors for seismic isolators: Design guidance for buildings. *MCEER Report*, 15-0005.

Norma Ecuatoriana de la Construcción, § 1 (2015).

Morales, E., Filiatrault, A., & Aref, A. (2017). *Sustainable and low cost room seismic isolation for essential care units in developing countries.* Paper presented at the 16th world conference on earthquake engineering, Santiago, Chile Google Scholar.

Nikolaou, S., Vera-Grunauer, X., Gilsanz, R., Luque, R., Kishida, T., Diaz-Fanas, G., & Lopez, S. (2017). *GEER-ATC Mw7. 8 Ecuador4/16/16 Earthqueake Reconnaissanc Part I: Seismilogical & Ground Motion Aspects.* Paper presented at the Santiago: 16th World Conference on Earthquake Engineering.

Phares, B. M., Rolander, D. D., Graybeal, B. A., & Washer, G. A. (2001). Reliability of visual bridge inspection. *Public Roads, 64*(5).

Romo, L. M. (2008). <Informe de Rediseño Estructural del Puente Bahía - San Vicente.pdf> *Memoria de Cálculo del Puente de Bahía de Caráquez* (Vol. 1, pp. 118).

Romo, M. (2016). *Los Caras Isolated Bridge in the 2016 Muisne Ecuador Earthquake: Behavior of Piers and Deep Pile Foundations*. (paper 6). Quito Ecuador.

Romo, M. (2017). *Apuntes sobre Comportamiento y Cimentaciones Profundas de Pilas del Puente "Los Caras"*. Quito.

Sarlis, A. A., & Constantinou, M. C. (2013). *Model of triple friction pendulum bearing for general geometric and frictional parameters and for uplift conditions*: MCEER.